Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten nicht-metallischer Gitter gegenüber elektrischen Wellen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

der hohen

Philosophischen Fakultät der Königl. Universität Breslau

eingereicht

und mit deren Genehmigung veröffentlicht von

Max Laugwitz

ACAD. LEOPOLD. BIBL.

Mittwoch den 9. Januar 1907 mittags 12 Uhr

in der Aula Leopoldina

VORTRAG:

„Die elektromagnetische Theorie des Lichtes und die Elektronentheorie in ihrer erkenntnistheoretischen Bedeutung“

und

Promotion.

Breslau 1907

Druck von Grass, Barth & Comp. (W. Friedrich)

Referenten: Prof. Dr. **Lummer** und Prof. Dr. **Pringsheim.**

Termin der mündlichen Prüfung: 7. November 1906.

Herrn Privatdozenten Dr. Schaefer

aus Dankbarkeit

Einleitung.

Bei den Hertzschen Versuchen beanspruchte das sogenannte Hertzsche Drahtgitter von jeher ein besonderes Interesse, insofern es elektromagnetischen Wellen gegenüber Erscheinungen zeigt, die bis dahin aus der Optik unbekannt waren. Das Hertzsche Gitter besteht bekanntlich aus einer Anzahl gutleitender Metalldrähte, die sämtlich parallel zu einander in einer Ebene angeordnet sind; zur Befestigung dieser Drähte dient gewöhnlich ein Holzrahmen.

Schaltet man ein solches Gitter senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung eines elektromagnetischen Wellenzuges in den Strahlengang ein, so tritt bekanntlich in einem dem Sender gegenübergestellten Empfänger die Wellenenergie ungeschwächt auf, falls die Drähte senkrecht zu dem elektrischen Vektor orientiert sind. Diese Tatsache mag in Anbetracht der geringen Dicke der Drähte zunächst nicht allzusehr überraschen. Dreht man aber das Gitter so, daß seine Ebene immer noch senkrecht zur Strahlrichtung, seine Drähte aber parallel dem elektrischen Vektor sind, so verschwindet die Energie bei hinreichend dichter Anordnung der Gitterdrähte vollständig im Meßresonator (Empfänger); das Gitter übt also nach hinten eine Schirmwirkung in diesem Falle aus, und es verhält sich so, als wäre seine Ebene eine kontinuierliche Metallwand; obwohl die Zwischenräume zwischen den einzelnen Drähten bis 100 mal so groß sind wie der Durchmesser eines einzelnen Drahtes, so kommen diese Zwischenräume für die Transmission der elektrischen Wellen nicht in Betracht.

Auf diese Weise läßt sich mittelst des Hertzschen Gitters sehr einfach die Transversalität der elektromagnetischen Wellen experimentell beweisen. Gleichzeitig stellt das Gitter in gewisser Hinsicht das Analogon dar zum Verhalten des Turmalins für transmittiertes Licht; denn der Turmalin läßt polarisiertes Licht auch nur in einer Richtung hindurch, dagegen ist er undurchlässig für die hierzu senkrechte Richtung. Hervorgehoben muß werden, daß bei Turmalin und dem Hertzschen Gitter

das verschiedene Verhalten nach den verschiedenen Richtungen in beiden Fällen abhängig ist von der inneren Struktur. Sie unterscheiden sich aber zunächst rein äußerlich, dadurch, daß das eine Gebilde diskontinierlich, das andere dagegen ein kontinuierlicher Körper ist. Gitter nämlich, welche auch den sichtbaren Strahlen gegenüber ein Verhalten zeigen, wie das Hertzsche Gitter bei den Hertzschen Wellen, kannte man nicht. Ja, es galt auch lange als ein unausführbares Problem, künstlich solche Gitter herzustellen, da man analoge Erscheinungen ja erst erwarten durfte bei einem Gitter, dessen Gitterkonstante klein, gegenüber der Wellenlänge des angewandten Lichtes war. Die Überwindung dieser enormen technischen Schwierigkeit scheint jedoch in neuester Zeit F. Braun[1]) gelungen zu sein.

Braun zerstäubte ganz dünne Platindrähte auf Glasplatten, indem er eine Batterie Leydener Flaschen durch dieselben hindurch schickte. Durch diese Zerstäubung kann man einen metallischen Niederschlag von gitterartiger Struktur auf der Glasplatte erhalten. Braun wies nun nach, daß polarisiertes Licht nur schwach durch diese Platten hindurchging, falls die Streifen des Niederschlages parallel dem elektrischen Vektor sind, daß dagegen die Transmission viel stärker war, falls sie senkrecht zu demselben gestellt waren. Vor Braun hatte übrigens schon Ambronn[2]) beobachtet, daß dünne Schnitte aus dem Holz der Koniferen, oder aus Sehnen von Mäuseschwänzen, die mit Goldchloridlösung getränkt, getrocknet und dem Sonnenlicht ausgesetzt waren, sehr schönen Dichroismus zeigten, indessen war ihm die Analogie zum Hertzschen Gitter nicht aufgefallen. Braun hat diese Beobachtungen benutzt, um umgekehrt aus der polarisierenden Wirkung gewisser Substanzen auf deren Gitterstruktur zu schließen; auf diesem Wege kann man Gitterstruktur oft noch dort nachweisen, wo die feinsten Mikroskope eine solche nicht mehr erkennen lassen. Immerhin sind diese Schlüsse, wie Braun[3]) selbst zugibt, wohl noch mit einiger Reserve aufzunehmen.

Ganz analoge Erscheinungen wie bei der Transmission ergeben sich, wenn man die Reflexion elektromagnetischer Wellen an einem Hertzschen Drahtgitter untersucht. Sind die Gitterdrähte zum elektrischen Vektor parallel, so wird fast der gesamte Betrag der auffallenden Energie zurückgeworfen; sind sie dagegen senkrecht zu ihm, so wird nichts oder nur sehr wenig reflektiert. In der Optik entspricht diesem Verhalten des Gitters die Reflexion des Lichtes an dichroitischen Krystallen, worauf zuerst W. Koenig[4]) hingewiesen hat.

---

[1]) F. Braun: Drudes Ann. 19 p. 1 u. 1905.

[2]) Ambronn. Sitzungsberichte der kgl. sächsischen Akademie. 7. Dez. 1896.

[3]) Braun. Dr. Ann. Bd. 16 p. 18. 1905.

[4]) cf. Hertz. Gesammelte Werke Bd. 2 p. 293. Ann. 26 und W. Koenig. Wied. Ann. 37.

Für die weiteren Überlegungen wird es wichtig werden, hervorzuheben, daß die gesamte auffallende Strahlung vom Gitter unter gewissen Umständen reflektiert wird, daß also bei dem Phänomen die Absorption keine Rolle spielt. Hiervon kann man sich z. B. in folgender Weise leicht überzeugen. Man mißt zunächst die vom Gitter reflektierte Strahlung für den Fall, daß Gitterdrähte und elektrischer Vektor einander parallel sind. Dann setzt man an Stelle des Gitters eine gleich große Metallwand und mißt wiederum die reflektierte Energie. Sind die Drähte nur eng genug, so erhält man in beiden Fällen denselben Wert; etwaige Differenzen bleiben innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler. Da nun aber bei einer Metallplatte i. a. die durchgelassene Energie Null ist, so bleibt nur noch der Anteil zu untersuchen, der etwa von der Metallwand absorbiert wird.

Nun haben aber die Versuche von Hagen und Rubens[1]) über das Reflexionsvermögen der Metalle eine Folgerung der Maxwellschen Theorie bestätigt, daß nämlich [unter gewissen, bei den Hertzschen Wellen stets erfüllten Bedingungen] das Absorptionsvermögen eines guten Leiters [d. h. der Bruchteil der auffallenden Energie, welcher absorbiert wird] der Beziehung gehorcht

$$1)\quad \alpha = \frac{2}{\sqrt{\sigma\tau}};$$

hierbei bedeutet

σ die Leitfähigkeit (elektrostatisch gemessen),
τ die Schwingungsdauer in Sekunden.

Für Kupfer z. B. ergeben sich[2]) bei einer Wellenlänge von 30 cm Länge folgende Daten:

$$\sigma = 5{,}14 \cdot 10^{17} \qquad \tau = 10^{-9}\ \text{sec.},\ \text{daher}$$

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{5{,}14 \cdot 10^{17} \cdot 10^{-9}}} < 10^{-4}$$

Es zeigt sich also, daß in der Tat die Energie, die in dem Leiter absorbiert wird, i. a. vernachlässigt werden darf gegenüber der reflektierten Strahlung.

Es ist nur noch die Größe, der oben unberücksichtigt gebliebenen, transmittierten Strahlung näher zu untersuchen. Die Amplitude der in einen Körper eindringenden Strahlung nimmt bekanntlich ab nach dem Gesetz:

$$e^{-2\frac{\pi}{\lambda} x \cdot k},$$

[1]) Hagen u. Rubens. Das Reflexionsvermögen der Metalle. Dr. Ann. (4), 11 p. 873. 1903.

[2]) cf. Abraham: Theorie der Elektrizität Bd. I.

wo λ die Wellenlänge
x den Abstand von der obersten Schicht des Körpers und
k den sog. Extinktionskoeffizienten
bedeutet.

k hängt von dem Material des betreffenden Körpers ab und gehorcht bei Metallen der Beziehung:

$$2)\quad k = \sqrt{\sigma\tau}$$

Hieraus folgt, daß wegen der großen Leitfähigkeit σ bei Metallen k sehr groß ist, d. h. die Intensität einer eindringenden Strahlung nimmt sehr rasch ab, sodaß schon dureh ganz dünne Metallschichten nichts mehr hindurchgeht. Je besser also die Leitfähigkeit, um so größer ist k und daher um so undurchlässiger ist der betreffende Körper. In einem Abstande $x = \frac{\lambda}{k} = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma\tau}}$ sind dem Amplituden auf den $e^{-2\pi}$ten Teil ihres an der Oberfläche herrschenden Wertes gesunken, die Energie also auf $e^{-4\pi}$ ten Teil. Das heißt aber bei einer Platte von der Dicke:

$$3)\quad d = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma\tau}} = \sqrt{\frac{c\lambda}{\sigma}}$$

ist die durchgehende Energie praktisch genommen Null. So ergibt sich bei unserem obigen Beispiel, daß eine Welle von 30 cm Wellenlänge nicht mehr durch eine Kupferplatte von $\frac{1}{100}$ mm hindurchgelassen wird.

Es zeigt sich also, daß gutleitende Metallplatten von der auffallenden Strahlung praktisch nichts transmittieren und daher völlig undurchsichtig sind. Da sie aber nach den obigen Ausführungen nur sehr wenig absorbieren, so wirken sie auf Hertzsche Wellen fast wie ein vollkommener Spiegel, welcher die gesamte auffallende Energie reflektiert. Es ist bei Platten von endlicher Dicke infolgedessen das Reflexionsvermögen [d. h. der Bruchteil der auffallenden Strahlung, welcher reflektiert wird,] gleich der auffallenden minus der absorbierten Strahlung, also

$$4)\quad R = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma\tau}} = 1 - \alpha$$

Aus der Formel 4 ersieht man gleichzeitig, daß die reflektierte Strahlung und die absorbierte zusammen gleich der gesamten auffallenden sind.[1]) Es folgt ferner hieraus unmittelbar, daß die reflektierte Strahlung um so größer und die transmittierte infolgedessen um so kleiner wird, je besser der Körper die Elektrizität leitet. Würde man also die Körper ihrer Leitfähigkeit nach ordnen, so wäre dies gleichzeitig ein Ordnen nach ihrer Undurchsichtigkeit resp. nach ihrem Reflexionsvermögen. Es ist dies eine äußerst wichtige und einfache

[1]) Bei absoluten Leitern ist die Absorption Null und bei metallischen Leitern ist sie praktisch genommen auch stets zu vernachlässigen.

Beziehung zwischen dem optischen und dem elektrischen Verhalten eines Körpers, sie zeigt so recht die Überlegenheit der elektromagnetischen Theorie des Lichtes über die alte elastische Lichttheorie. Mit Hilfe dieser Beziehung kann man durch reine Strahlungsmessungen die Leitfähigkeit eines Körpers bestimmen.

Für das Gebiet der sichtbaren Lichtwellen gilt die Abhängigkeit der Durchsichtigkeit eines Körpers von seiner Leitfähigkeit zwar nicht mehr in solcher Einfachheit, weil dann schon die Struktur und die molekularen Schwingungen einen beträchtlichen Einfluß gewinnen. Aber schon bei $\lambda = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ cm, d. h. im ultraroten Gebiet, ist von Hagen und Rubens jene einfache Folgerung der ursprünglichen Maxwellschen Theorie experimentell bestätigt worden.

Je länger ferner die Wellen wurden, um so geringer wird die Absorption, um so mehr nähert sich bei demselben Körper das Reflexionsvermögen der Eins, wie die obigen Formeln 1 und 4 zeigen und ebenfalls von den beiden genannten Forschern experimentell bestätigt worden ist.

Man denkt sich das Zustandekommen der oben charakterisierten Gittereigenschaften in der Weise, daß man annimmt, die Elektronen seien in guten Leitern völlig frei beweglich; infolge dieses Umstandes können sich Spannungsunterschiede an den einzelnen Teilen eines Drahtes nicht halten, sie gleichen sich aus, es entsteht ein Strom. Nun wird in unserm Beispiel durch den Hertzschen Erreger das den Draht umgebende Feld in der Sekunde tausend Millionen mal d. h. 10^9 mal gewechselt; bei jedem Feldwechsel entsteht also ein elektrischer Strom, jedesmal in entgegengesetzter Richtung wie der vorangegangene. Es entstehen auf diese Weise in einem einzelnen Gitterdraht ebenfalls elektrische Schwingungen, die synchron sind denen im Erreger.[1])

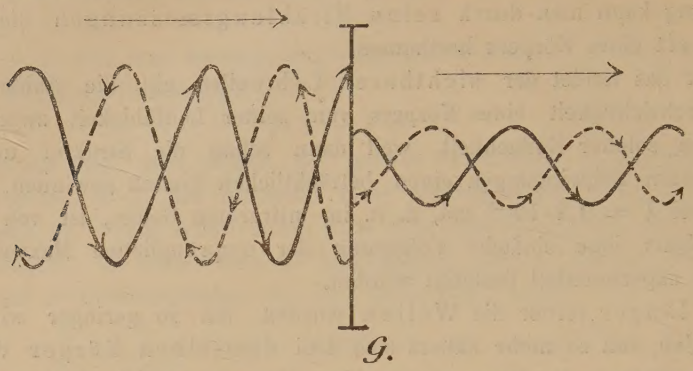
Haben wir es nun mit einem ebenen Wellenzuge zu tun, der auf ein Gitter von ganz dünnen Metalldrähten fällt, so werden sämtliche Drähte gleichzeitig von Wellen derselben Phase getroffen; in allen Gitterdrähten entstehen nun neue Wellen von ein und derselben Phase unter einander. Der resultierende Schwingungszustand auf Grund dieser sekundären Wellen ist daher infolge der parallelen Anordnung der Gitterstäbe in einer Ebene wiederum eine ebene Welle. Man kann dies als eine äußerst anschauliche Illustration zum Huygensschen Prinzip betrachten.

Es überlagern sich also in diesem Falle zwei Wellenzüge, welche hinter dem Gitter dieselbe Fortpflanzungsrichtung haben und sich infolge ihrer Phasenverschiebung daher aufheben können, in jedem Falle aber schwächen müssen.

---

[1]) Näheres hierüber vergleiche z. B.
Starke: Experimentelle Elektrizitätslehre p. 316.
Cl. Schaefer und Max Laugwitz: Über die bei Reflexion an Hertzschen Gittern auftretenden Phasenverluste: Annalen d. Physik. Bd. 21 p. 587.

Aus ganz ähnlichen Gründen kommt es zwischen Gitter und Sender zur Bildung stehender Wellen. Wir können uns infolgedessen etwa folgendes Bild von dem Vorgange machen. Fig. I.



G bedeutet das Gitter, [seine Drähte sind nicht ausgezeichnet].[1])

Notwendig für das Folgende aber ist es ausdrücklich hervorzuheben, daß die oben angestellten Schlußweisen für die Übereinanderlagerung nur dann in solcher Einfachheit möglich sind, wenn es sich um ebene Wellen handelt.

Für ein Gitter, dessen Stäbe von derselben Größe, wie die Wellenlänge sind, also für ein sogenanntes Resonatorengitter, gelten im Prinzip naturgemäß dieselben Schlüsse, was unten des Näheren ausgeführt wird.

Diese obigen theoretischen Ausführungen sind die allgemein als richtig angesehenen; sie sind auch durch das Experiment als hinreichend gestützt zu betrachten.[2]) Ich hielt es trotzem für angebracht, diese Frage hier etwas ausführlicher zu behandeln, weil sie erstens von grundlegender Bedeutung ist und weil außerdem vor kurzem eine Arbeit über Strahlungsmessungen[3]) erschienen ist, der eine ganz falsche Auffassung zugrunde liegt. Der Verfasser dieser Arbeit, M. Paetzold, hat Beobachtungen gemacht, die seiner Meinung nach der obigen allgemeinen Auffassung widersprechen, und er versucht auch eine Erklärung seiner Beobachtungen zu geben.

Da die oben zitierte Arbeit auch in andrer Hinsicht mehrfache Irrtümer resp. Mißverständnisse enthält, so sind bereits einige[4]) Erwiderungen

---

[1]) Die primäre Welle ist ausgezogen, die sekundäre gestrichelt gezeichnet, transmittierte und reflektierte Welle sind durch Pfeilrichtung gekennzeichnet.

[2]) Ich verweise zu dem Zwecke auf Starke: Experimentelle Elektrizitätslehre p. 316 ff.

[3]) Paetzold: Dr. Ann. Bd. 19 p. 116—137. 1906.

[4]) Aschkinaß. Drudes Ann. der Phys. 18. p. 373. 1905.
Garbasso. Drud. Ann. Bd. 20. 1906. p. 846.
Cl. Schaefer u. M. Laugwitz: Zur Theorie des Hertzschen Erregers. Drud. Ann. 20. p. 355.

auf dieselbe erschienen, und auch ich habe in einer gemeinsam mit Cl. Schaefer veröffentlichten Arbeit die wesentlichsten Punkte richtig zu stellen gesucht.

Wir sahen oben, daß in jedem Draht eines Hertzschen Metallgitters Schwingungen stattfinden, wenn ein elektromagnetischer Wellenzug auf das Gitter fällt. Nimmt man einen einzigen Metallzylinder, so zeigt er qualitativ dieselben Eigenschaften wie ein ganzes Gitter aus solchen Drähten. Es ist nun zuerst von J. J. Thomson[1]) die Theorie für einen Draht von unendlicher Leitfähigkeit ausgearbeitet worden.[2]) Erst seit Beginn dieser Arbeit ist von Seitz[3]) und Ignatonski[4]) gleichzeitig die Theorie erweitert worden auf einen Draht von endlicher Leitfähigkeit. Die Wirkung des gesamten Gitters beruht nun auf den Wirkungen der einzelnen Drähte; man muß aber berücksichtigen, daß die Drähte sich gegenseitig beeinflussen und zwar mehr oder weniger, je nach der Größe ihres gegenseitigen Abstandes. Es addieren sich also ihre Wirkungen nicht einfach; hierdurch wird die Theorie eines Hertzschen Gitters so kompliziert, daß sie eine allseits befriedigende Lösung noch nicht gefunden hat. Aber auch ohne die mathematische Entwicklung hat man sich doch bereits ziemlich bestimmte Vorstellungen gemacht von den physikalischen Vorgängen in einem solchen Draht. Wir sahen oben, daß es sich bei den Reflexionserscheinungen um eine Superposition zweier Wellenzüge handelt, von denen der eine auf den (Elektronen)-Schwingungen im Erreger, der andre auf den hierdurch im Drahte erzeugten sekundären Schwingungen beruht.

Die Gitterwirkung führen wir im wesentlichen auf die Wirkungen der einzelnen Drähte zurück; die Erscheinungen an Metallplatten können wir uns dadurch erklären, daß wir die Platten aus lauter parallelen Drähten bestehend denken.[5]) Jeder einzelne Draht wiederum zerlegt sich in lauter solche Teile, daß jeder dieser Teile in Resonnanz steht mit dem Erreger.

Es bietet sich somit vielleicht ein Weg, um sich von den physikalischen Vorgängen auch bei der gewöhnlichen Reflexion eine klarere Vorstellung zu bilden. Denn wenn wir auch aus den Maxwellschen Gleichungen alle Tatsachen mathematisch ableiten können, so fehlt uns doch jedes Bild von den wirklichen Vorgängen. Solche Bilder wären hier

---

[1]) J. J. Thomson. Recent Researches in Electricity. p. 425; 428—437.

[2]) Diese Theorie aber ist nicht völlig richtig, da Thomson, ebenso wie Seitz (in der 1. Arbeit) ein unbrauchbares Integral der Besselschen Differentialgl. nimmt.

[3]) Seitz. Ann. d. Phys. 16. p. 746—772. 1905.
u. 19. p. 554. 1906.

[4]) Ignatovski. Ann. d. Phys. 18. p. 495—523. 1905.

[5]) cf. H. Ebert. Theorie des Elektromagnetismus im Heinkeschen Handbuch der Elektrotechnik. Bd. I. Abt. III. p. 45.

aber um so wertvoller, als wir mit Hilfe der elektromagnetischen Wellen, bei denen wir die Versuchsbedingungen willkürlich abändern können, die verschiedenen Bilder in ihren Konsequenzen experimentell prüfen können. Ein Fortschritt unserer theoretischen Ansichten auf diesem Gebiete ließe auch bald einen experimentellen Fortschritt erwarten.

Bei der ungemeinen Bedeutung, welche also das Hertzsche Gitter infolge seiner Analogien zu gewissen optischen Erscheinungen besitzt, ist um so mehr auf etwaige Unterschiede zwischen dem Verhalten der optischen und der Hertzschen Wellen Gewicht zu legen. Es muß infolgedessen hervorgehoben werden, daß das Zustandekommen der Hertzschen Gittererscheinungen lediglich auf der großen Leitfähigkeit der Metalle beruht. Die dichroitischen Krystalle aber, zu denen das Gitter das Analogon darstellt, sind gerade Nichtleiter, Dielektrika. Hieraus folgt unmittelbar, daß die Analogie zwischen beiden eine rein äußerliche ist. Ihre dichroitischen Eigenschaften müssen in beiden Fällen im letzten Grunde auf ganz verschiedenen Ursachen beruhen. Bisher hatte man also polarisierende Wirkung nur durch Leitfähigkeit erzeugen können, nun aber ergibt sich auf Grund der oben angestellten Überlegungen naturgemäß die Fragestellung, ob diese Wirkung nicht auf andere Weise ebenfalls realisiert werden könne.

Zu diesem Zwecke baute ich auf Veranlassung von Herrn Privatdozent Dr. Schaefer ein Gitter, dessen einzelne Stäbe aus Drähten von dielektrischem Material bestanden. War überhaupt mit solchen Gittern eine polarisierende Wirkung vorhanden, so konnte man erwarten, daß sie um so stärker ausgeprägt sein werde, je größer die Dielektrizitätskonstante des gewählten Materials war. Es fiel also naturgemäß die Wahl auf Wasser. Auf etwaige Bedenken wegen der Leitfähigkeit des Wassers wird weiter unten genauer eingegangen werden; bei einem ersten Versuche konnten dieselben wohl zunächst zurückgestellt werden.

Von vornherein konnte man den Einfluß eines solchen Gitters aus dielektrischen Stäben nicht ohne weiteres voraussehen. Hier mußte das Experiment also entscheiden.

Apparate und Beobachtungsmethode.

1. Erreger.

Zur Erzeugung der elektrischen Wellen diente ein Hertzscher Erreger, der aber in gewisser Hinsicht modifiziert war. Er bestand aus zwei gleichlangen, horizontal gestellten Messingzylindern. die fest in einen hohlen Hartgummizylinder eingeschraubt waren. Der Funke zwischen den beiden Metallzylindern sprang in Petroleum über, welches sich im Hohlraum des Hartgummizylinders befand; hierdurch erhält man bekanntlich eine gleichmäßigere Funkengröße und außerdem auch bedeutend größere Energie.

An der Funkenstrecke zwischen den beiden Messingstäben befand sich ein kurzer etwa 1—2 mm langer Stift aus Aluminium von ca. 1 mm Stärke. Diese Anordnung war getroffen, weil man eine möglichst scharf ausgeprägte Eigenperiode des Senders haben will; zu dem Zwecke aber muß die Dämpfung im Erreger, und damit der Widerstand möglichst gering sein. Der Hauptwiderstand aber findet an der Funkenstrecke statt, diese muß also möglichst klein gemacht werden. Man konnte mit Hilfe dieser kleinen Aluminiumstifte die Annäherung der beiden Metallzylinder bedeutend höher treiben und auch die Justierung genauer vornehmen. Sind dagegen Kuppen oder Kugeln[1]) an der Funkenstrecke, so nützen sich die verschiedenen Stellen derselben sehr ungleichmäßig ab, es springt infolgedessen der Funke nicht immer an derselben Stelle über, sodaß eine feinere Einstellung der Funkenstrecke oft illusorisch gemacht wird.

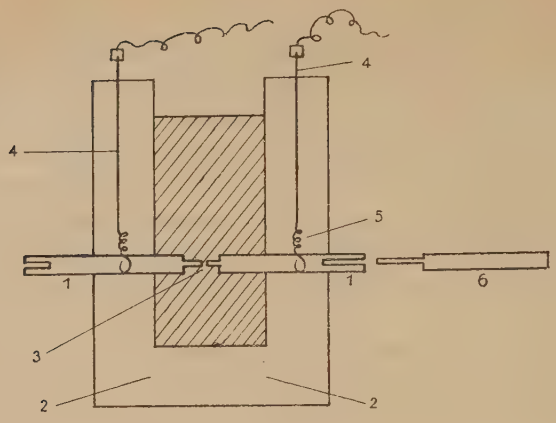
Aluminium wurde aus dem Grunde gewählt, weil ich bei den Vorversuchen gefunden hatte, daß es sich bedeutend weniger abnutzt als das von Himstedt empfohlene Zink. Platin erwies sich infolge der Zerstäubung am allerungünstigsten, gleichfalls sehr ungeeignet war eine Legierung von Platin-Iridium.

Da die Zuleitung zum Hertzschen Erreger womöglich in der Nähe der Funkenstrecke erfolgen soll, andererseits auch die Leitung durch Gefäßwandungen vermieden werden muß, so waren feste Messingdrähte senkrecht und zwar vertikal zu dem eigentlichen Erreger in den Kautschukzylinder eingebohrt; diese waren ursprünglich fest auf die horizontalen Zylinder angedrückt, um unkontrollierbare Funken zwischen dem Zuleitungsdraht und dem eigentlichen Sender zu vermeiden. Es zeigte sich aber, daß infolge des starken Andrückens bald die Gewinde im Kautschuk undicht wurden. Da infolge des Petroleums aber der Dichtung besondere Rechnung getragen werden mußte, so wurde der oben beschriebene Zuleitungsdraht mit dem Staboszillator nicht direkt, sondern erst vermittels einer Spiralfeder verbunden. Hierdurch vermied man jenen starken Druck, und die Gewinde blieben selbst nach wiederholten Schraubenregulierungen dicht. Die vertikalen Zuleitungsdrähte waren von oben nach unten in den Kautschuk eingebohrt, sodaß durch ihre Bohrungen Petroleum nicht abfließen konnte.

In der Figur bedeutet:

1. Metallenen Staboszillator, an dem äußeren Ende ausgehöhlt,
2. Kautschukzylinder, innen mit Petroleum gefüllt,
3. Aluminiumstifte,
4. die vertikalen festen Zuleitungsdrähte,

[1]) Welche gewöhnlich Verwendung finden.



5. metallische Spiralfedern,
6. Steckkontakt, dessen Bedeutung siehe S. 26.

2. Thermoelement.

Dieser Sender sandte Wellen von 60 mm aus. Er wurde in den Brennpunkt eines Hohlspiegels gestellt, dem gegenüber sich ein zweiter Hohlspiegel in einer Entfernung von 2,50 m befand.

Im Brennpunkt dieses zweiten Hohlspiegels befand sich ein Klemencicsches Thermoelement[1]) als Meßapparat für die Intensität der elektrischen Wellen. Sender und Thermoelement waren gegenseitig auf eine Wellenlänge von 60 mm abgestimmt.

3. Diaphragma.

Um vor etwaigen seitlichen Strahlen geschützt zu sein und um möglichst mit Zentralstrahlen zu arbeiten, waren noch zwei große Metallschirme mit je einer Öffnung von 24 × 32 cm eingeschaltet. Um ferner wirklich linear polarisiertes Licht (Strahlen) zu erhalten, befand sich vor dem ersten Diaphragma ein Hertzsches Drahtgitter, dessen Ebene senkrecht zur Strahlrichtung stand und dessen Drähte vertikal, senkrecht zum elektrischen Vektor waren. In einem Abstande von je 50 cm befand sich zwischen diesen beiden Metallschirmen ein Holzgestell, auch dieses hatte einen Ausschnitt. An dieses Holzgestell wurde das weiter unten beschriebene Gitter aufgehängt.

4. Galvanometer.

Das Thermoelement war an ein äußerst empfindliches[2]) Du Bois-Rubenssches Kugelpanzergalvanometer angeschlossen; zum Schutze gegen äußere magnetische Störungen war das Galvanometer mit unmagnetischem Eisen dreifach gepanzert; um erschütterungsfrei zu sein, befand es sich in

[1]) J. Klemencic Wied. Ann. 45. p. 78. 1892.

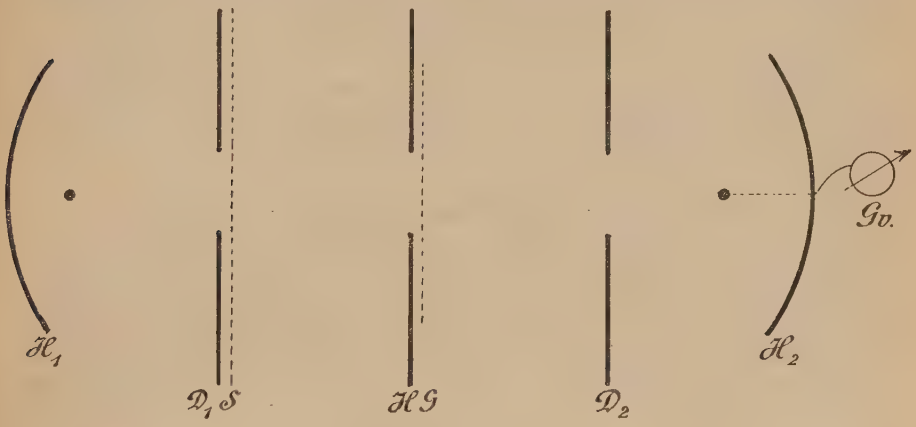
[2]) Astasiert war das Galvanometer gleichfalls sehr hoch; die halbe Schwingungsdauer betrug beim schweren Magnetsystem 8 sec.

der Julius'schen Aufhängung. Die Galvanometerausschläge wurden mittels Fernrohr nach der Poggendorffschen Spiegelablesungsmethode beobachtet.

Die isolierten Zuleitungsdrähte vom Thermoelement zum Galvanometer waren zum Schutze gegen diffuse Strahlung mit Staniol belegt, das leitend mit der Erde verbunden wurde.

5. Aufbau.

Der gesamte Aufbau hatte also schmematisch betrachtet folgendes Aussehen.



Hierin bedeutet:

H_1 den Hohlspiegel, in dessen Brennpunkt sich der Sender befindet,
H_2 den andern Hohlspiegel mit Thermoelement,
D_1 und D_2 die beiden Metalldiaphragmen,
S das zum Schutze hingehängte Drahtgitter,
H das Holzgestell,
Gv das Galvanometer und
G das zu untersuchende Gitter.

6. Gitter.

Um nun ein Gitter zu erhalten, bei dem die Metalldrähte durch Wasserfäden ersetzt wären, stellte ich mir zunächst ein Gitter aus Glasröhren her, die ich mit Wasser füllte. Die Länge jeder Röhre betrug 48 cm, ihre Lichtweite 0,4 cm und ihr gegenseitiger achsialer Abstand 1 cm. 48 dieser Röhren waren in einen Holzrahmen eingespannt, welcher die Größe 50×50 cm hatte.

7. Beobachtungsmethode.

Die Art der Beobachtung geschah in der Weise, daß zunächst die freie Strahlung gemessen wurde; dann schob ich das Gitter ein und beobachtete nun den Ausschlag am Galvanometer; wiederholte diese beiden Messungen in derselben Reihenfolge mehrmals und schloß wiederum mit der

Bestimmung der freien Strahlung die Beobachtungsreihe. Diese alternierende Art der Beobachtung, bei der man stets mit der Größe wieder aufhört, mit der man zu messen angefangen hat, geschah aus demselben Grunde wie bei der Nullpunktsbestimmung einer feinen Wage. Die vom Erreger ausgestrahlte Energie nimmt nämlich, entsprechend der Dämpfung bei der Wage, i. a. beständig ab, hier aber infolge der an der Funkenstrecke auftretenden Korrosionen. Aus einer solchen Beobachtungsreihe bestimmte ich nun denjenigen Bruchteil der Gesamtstrahlung, welcher durch das Gitter zurückgehalten wurde. Bei jedem der beobachteten Gitter stellte ich etwa 3 solcher Beobachtungsreihen an und nahm aus den so gefundenen Werten das Mittel. Auch bei den später beobachteten Gittern stimmten die Werte sehr gut mit einander überein; nach der Methode der Theorie der Ausgleichung der Beobachtungsfehler ergaben sich mittlere Fehler von 0,5 bis 4 %.

Ergebnis der Beobachtungen.

Es ergab sich — mir damals überraschend — folgendes Resultat. Waren die Gitterstäbe vertikal, also senkrecht zu dem elektrischen Vektor, so ging die gesamte auffallende Strahlung ungeschwächt durch das Gitter hindurch. Drehte man dagegen das Gitter um 90^0 in seiner Ebene, sodaß also die Gitterstäbe horizontal standen, so ließ es fast nichts von der auffallenden Energie hindurch; es zeigte also das nämliche Verhalten wie ein Gitter aus **Metall**stäben.

Diese Erscheinung kam mir deshalb unerwartet, weil nach der ursprünglichen Maxwellschen Theorie alle Dielektrika für elektromagnetische Wellen durchlässig sind. Demnach hätte man annehmen müssen, daß auch durch solche Stäbe die elektromagnetischen Wellen ungehindert hätten hindurchgehen müssen, soweit sie überhaupt eindringen und nicht an der vorderen Schicht reflektiert werden. Nun ist aber hierbei zu beachten, daß dieser reflektierte Teil sehr beträchtlich ist. Denn die Theorie lehrt, daß bei Nichtleitern — und Wasser soll vorläufig als solcher angenommen werden — das Reflexionsvermögen vollständig durch die dem Körper zukommende Dielektrizitätskonstante (D—K) bestimmt ist und zwar durch die Formel:

$$R = \frac{(\sqrt{k} - 1)^2}{(\sqrt{k} + 1)^2}$$

Hierbei bedeutet:

R das Reflexionsvermögen.

k die Dielektrizitätskonstante.

Bei Wasser ist aber $k = 81$, also beträgt die an der Vorderschicht reflektierte Strahlung 64 % der auf sie auffallenden Strahlung. Da an der Rückwand nochmalige Reflexion auftritt, so war also anzunehmen,

daß das Wassergitter in jeder Orientierung nur einen sehr geringen Teil der auffallenden Strahlung durchlassen würde, auch wenn die Gitterstäbe vertikal zum elektrischen Vektor ständen. Das Experiment zeigte aber, daß für diesen Fall die reflektierte Strahlung so gering war, daß sie gar nicht in Betracht kam; es war vielmehr die transmittierte Strahlung fast der gesamten auffallenden gleich.

Andererseits ist allerdings zu berücksichtigen, daß wir es hier nicht mit einer kontinuierlichen Wasserschicht zu tun haben, sondern nur mit einzelnen Wasserstäben, zwischen denen Abstände bestehen, die größer sind als der Durchmesser eines Fadens. Es war daher um so auffallender, daß so gut wie nichts durch das Gitter hindurchging, falls die Wasserfäden dem elektrischen Vektor parallel waren.

Um aber festzustellen, daß diese polarisierende Wirkung des Gitters in der Tat dem Wasser und nicht etwa den Glasröhren zuzuschreiben sei, untersuchte ich ein ganz konformes Gitter, das aber leer war. Es zeigte sich dasselbe ohne merkbaren Einfluß auf die elektormagnetischen Wellen, es absorbierte in jeder Stellung, jedem Inzidenz-Azimut so gut wie nichts. Zu berücksichtigen ist, daß das Glas sehr dünnwandig war. Somit war in der Tat der Beweis erbracht, daß die Polarisationswirkung dem in den Röhren befindlichen also in Stabform angeordnetem Wasser zugeschrieben werden mußte.

Problemstellung.

Es handelte sich nun darum festzustellen, welcher physikalischen Größe des Wassers diese polarisierende Eigenschaft zugeschrieben werden mußte. Das Verhalten eines Körpers einer elektromagnetischen Strahlung gegenüber ist der Maxwellschen Theorie zufolge durch 3 Konstante charakterisiert, die dem Körper eigentümlich sind, d. i. seine Leitfähigkeit σ, seine Permeabilität μ und seine D-K k.

Bei allen Metallen hat nun die D-K. wahrscheinlich denselben Wert, nämlich den Wert Eins; wenigstens genügt diese Annahme, um allen Tatsachen gerecht zu werden. Schließt man ferner die ferromagnetischen Substanzen Eisen, Nickel, Kobalt aus, so ist auch ihre Permeabilität annähernd stets gleich Eins zu setzen. Alle Metalle unterscheiden sich von dem Äther wesentlich nur durch ihre Leitfähigkeit σ. Dieser eine Unterschied genügt aber auch, um ihr Verhalten gegen elektromagnetische Wellen zu charakterisieren.

Aus unserm Versuch ergab sich nun, daß das Wassergitter i. B. a. die Durchlässigkeit elektromagnetischer Wellen sich gerade so verhielt wie ein Metallgitter. Es liegt daher nahe, die oben beschriebenen Erscheinungen auf Rechnung der Leitfähigkeit des Wassers zu setzen.

Es ist nun der wichtigste Teil der folgenden Untersuchung zu zeigen, daß die Leitfähigkeit des Wassers hier **nicht** in Betracht kommt.

Über Leitfähigkeit der Elektrolyte.

Zunächst müssen wir zu dem Zwecke die Leitfähigkeit der Elektrolyte selbst etwas genauer betrachten, um vielleicht durch eine einfache Überlegung die Sache zu entscheiden oder aber um die Schwierigkeit des Problems besser zu übersehn. Es ist richtig, daß gewöhnliches Wasser für stationäre elektrische Ströme eine ziemlich beträchtliche Leitfähigkeit besitzt; bei den Elektrolyten, wie Schwefelsäure ist die Leitfähigkeit noch viel größer. Haben wir es aber mit sehr schnellen Wechselströmen zu tun, bei denen die Stromrichtung etwa 10^{15} mal in der Sekunde wechselt, wie dies bei den sichtbaren Wellen der Fall ist, so kommt die Leitfähigkeit selbst der bestleitenden Elektrolyte meist gar nicht mehr in Betracht; denn viele Elektrolyte sind für optische Wellen vollkommen durchlässig, durchsichtig; dies wäre aber bei großer Leitfähigkeit nach den Ausführungen in der Einleitung dieser Arbeit unmöglich. Es ist mithin bei Elektrolyten die Leitfähigkeit σ keine absolute Konstante, sondern eine Funktion der Wellenlänge, die mit abnehmender Wellenlänge ebenfalls abnimmt. E. Cohn[1]) hat auch eine sehr einfache Erklärung für dieses Verhalten der Elektrolyte gegeben. Da bekanntlich die Leitung des elektrischen Stromes bei allen Elektrolyten auf einem Transport von Ionen beruht, so ist sie verknüpft mit einem Transport materieller und daher träger Massen. Wenn nun der Strom etwa 500 Billionen mal seine Richtung in der Sekunde ändert, so können die trägen Massen diesen schnellen Schwingungen nicht folgen, es tritt keine Wanderung der Ionen d. h. kein „Leitungs"-, oder besser gesagt kein „Konvektionsstrom" auf. Die Elektrolyte verhalten sich daher wie Nichtleiter.

Da also selbst die bestleitenden Elektrolyte für Lichtschwingungen sich wie Nichtleiter verhalten können, so liegt es nahe zu glauben, daß Wasser, sowie sämtliche Elektrolyte, sich bei den Hertz'schen Wellen ähnlich verhalten müssen. Dies ist aber nicht der Fall, denn die Frequenz der Hertzschen Wellen ist bedeutend geringer, sie ist von der Größenordnung 10^{10} und E. Cohn hat nachgewiesen, daß aus den Werten für das molekuläre Leitvermögen und aus den Werten für die Überführungszahlen mit Notwendigkeit folgt, daß das Ohmsche Gesetz für Schwingungen von der Periode 10^{+9} noch genau so gilt wie für stationäre Ströme.

Auf Grund dieser Erwägung läßt sich also eine Entscheidung der Frage noch nicht fällen.

Überblick über die folgenden Beweise.

Es läßt sich aber auf andere Weise feststellen, daß beim Wasser der überwiegende Einfluß der hohen D-K zukommt und nicht der Leitfähigkeit. Hierzu führt zunächst eine einfache Berechnung des Verhältnis von

---

[1]) E. Cohn. Wied. Ann. 38 p. 217. 1889.

Leitungs- zu Verschiebungsstrom; ferner ergibt sich dies aus dem Fehlen selektiver Eigenschaften von kurzen Wasserfäden, die man nach Art metallischer Resonatoren zu einem Resonatorengitter angeordnet hat. Drittens aber kann man sich durch einen Vergleich des Wassergitters mit Gittern aus andern Substanzen überzeugen, daß die Leitfähigkeit eine ganz untergeordnete Rolle spielen muß; wenn nämlich diese Substanzen ebenfalls eine hohe D-K aber so gut wie gar keine Leitfähigkeit besitzen und doch denselben Effekt zeigen.

Ich habe alle drei Beweise geführt, weil sich nämlich zeigen wird, daß keiner ganz überflüssig ist und weil sich außerdem noch einige weitere interessante Fragen hierbei werden erledigen lassen. Diese drei oben skizzierten Wege sollen nun im folgenden des näheren ausgeführt werden.

I. Berechnung des Verhältnisses von Leitungs- zu Verschiebungsstrom. Theoretischer Beweis.

Es ist die Größe $\mathfrak{J}$ des Verschiebungsstromes bekanntlich proportional dem 1. Differentialquotienten der elektrischen Feldintensität (genommen nach der Zeit), und auch proportional der Dielektrizitätskonstanten, also

$$1)\quad \mathfrak{J} = \frac{K}{4\pi}\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t},$$

wo $\mathfrak{E}$ den elektrischen Vektor bedeutet und $\mathfrak{J}$ und $\mathfrak{E}$ elektrostatisch gemessen sind.

Bedeutet ferner σ die Leitfähigkeit, so ist die Intensität $\mathfrak{J}'$ des Leitungsstromes bekanntlich proportional der Feldintensität selbst, nicht ihrem Differentialquotienten, und σ ist der Proportionalitätsfaktor; also:

$$2)\quad \mathfrak{J}' = \sigma\,\mathfrak{E}.$$

Es ergibt sich somit als Verhältnis von Verschiebungs- zu Leitstrom:

$$3)\quad \mathfrak{J}\Big/\mathfrak{J}' = \frac{K}{4\pi}\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}\cdot\frac{1}{\sigma\mathfrak{E}}$$

$\mathfrak{E}$ gehorcht nun folgender Beziehung:

$$5)\quad \mathfrak{E} = e^{2\pi i\left(\frac{t}{T}-\delta\right)}.$$

Hierbei bedeutet T die Schwingungsdauer und δ die Phasenkonstante, die natürlich Funktion von x, y, z ist.

Es wird daher

$$6)\quad \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} = e^{2\pi i\left(\frac{t}{T}-\delta\right)}\cdot\frac{2\pi i}{T} = \frac{2\pi i}{T}\cdot\mathfrak{E}.$$

Führen wir statt der Schwingungsdauer T noch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c des Lichtes und die Wellenlänge λ ein, so ergibt sich aus 6):

$$6')\quad \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} = \frac{2\pi i c}{\lambda}\,\mathfrak{E}.$$

und daher für das Verhältnis der beiden Stromstärken, absolut genommen:

$$7) \quad \left| \mathfrak{J}/\mathfrak{J}' \right| = \left| \frac{K}{4\pi} \cdot \frac{2\pi c}{\lambda} \cdot \mathfrak{E} \cdot \frac{1}{\sigma \mathfrak{E}} \right| = \left| \frac{K c}{2 \lambda \sigma} \right|$$

Es zeigt sich also zunächst aus Gleichung 7), daß das Verhältnis der beiden Stromstärken unabhängig ist von der elektrischen Feldintensität, da $\mathfrak{E}$ aus der Gleichung herausfällt.

Hat man es ferner mit demselben Körper zu tun, so ist außer 2c auch K und σ konstant, die einzige Variable ist λ. Setzt man daher

$$\frac{K c}{2 \sigma} = C,$$

so ergibt sich die äußerst einfache Beziehung:

$$7a) \quad \mathfrak{J}/\mathfrak{J}' = \frac{C}{\lambda}.$$

d. h.

> das Verhältnis der beiden Stromstärken ist bei demselben Körper umgekehrt proportional der Wellenlänge. Bei verschiedenen Körpern und konstanter Wellenlänge andererseits ist dieses Verhältnis proportional der D-K und umgekehrt proportional der Leitfähigkeit.

Nunmehr wollen wir an einigen Beispielen das Verhältnis der beiden Stromstärken zahlenmäßig berechnen. Wir nehmen zunächst ein gutleitendes Metall, wie Kupfer und haben

$\sigma = 6 \cdot 10^5$ Ohm^{-1} $= 6 \cdot 10^5 \cdot 9 \cdot 10^{+11}$ absolute elektrostatische
$\sigma = 5{,}4 \cdot 10^{17}$ Einheiten.

Daher[1]) ist das Verhältnis $\mathfrak{J}/\mathfrak{J}'$ für Wellen von 3 cm Länge von der Größenordnung 10^{-8} d. h. bei den gutleitenden Metallen ist selbst mit den feinsten Instrumenten ein Einfluß des Verschiebungsstromes nicht zu beobachten.

Aber auch bei den schlechter leitenden ist dies noch der Fall; denn nehmen wir das am schlechtesten leitende Metall, Quecksilber, so ist nach Strecker[2]) bei Zimmertemperatur:

$\sigma = 1{,}04 \cdot 10^4$ Ohm^{-1} $= 9{,}4 \cdot 10^{15}$ absolute elektrostatische Einheiten.

Es wird daher das Verhältnis von der Größenordnung $5 \ldots 10^{-6}$; also der Verschiebungsstrom beträgt rund den millionsten Teil des Leitungsstromes, kommt ihm gegenüber also gar nicht in Betracht.

Für maximalleitende Schwefelsäure ist

$$\sigma = 6{,}3 \cdot 10^{11} \text{ absolute Einheiten}$$

$$\mathfrak{J}/\mathfrak{J}' = 6{,}4 \cdot 10^{-1}$$

---

[1]) Nach den einleitenden Ausführungen setzt man bei allen Metallen K = 1.
[2]) cf. Landolt u. Börnstein, Physik.-chem. Tabellen.

Also bei den Elektrolyten besitzt der Verschiebungsstrom annähernd dieselbe Bedeutung wie der Leitungsstrom.

Gehen wir jetzt zu destilliertem Wasser über, dessen Leitfähigkeit $\sigma = 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{11} = 9 \cdot 10^5$ absolute elektrostatische Einheiten beträgt, so folgt als Verhältnis der Intensitäten beider Ströme:

$$\frac{\mathfrak{J}/}{/\mathfrak{J}} = \frac{3 \cdot 10^{10} \cdot 81}{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 9} = 4{,}5 \cdot 10^5$$

Für Wasser also ist der Verschiebungsstrom zirka hunderttausendmal stärker als der Leitungsstrom, letzterer kann daher ohne weiteres vernachlässigt werden.

Es ergibt sich aus unsern Beispielen folgende Tabelle:

	σ	$2\lambda\sigma$	K	$\frac{\mathfrak{J}/}{/\mathfrak{J}}$
Cu	$5{,}4 \cdot 10^{17}$	$3{,}2 \cdot 10^{18}$	1	10^{-8}
Hg	$9{,}4 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{16}$	1	$5 \cdot 10^{-6}$
H_2SO_0	$6{,}3 \cdot 10^{11}$	$3{,}8 \cdot 10^{12}$	81	$6{,}4 \cdot 10^{-1}$
H_2O	$9 \cdot 10^5$	$5{,}4 \cdot 10^6$	81	$4{,}5 \cdot 10^{+5}$

Ergebnis.

Aus diesen Rechnungen ergibt sich also, daß[3]) selbst für die schlechtleitenden Metalle der Verschiebungsstrom vollständig vernachlässigt werden darf, daß er bei Elektrolyten sehr wohl Einfluß haben kann, daß aber Wasser sich wie ein Nichtleiter verhalten muß, also bei ihm der Leitungsstrom verschwindend klein ist gegenüber dem Verschiebungsstrom. Hieraus folgt also auch, daß die Leitfähigkeit nicht die Ursache für die oben beschriebenen Erscheinungen des Wassergitters sein kann.

II. Resonanzerscheinungen; erster experimenteller Beweis.

Durch die obigen Ausführungen hatte sich rechnerisch ergeben, daß beim Wasser die Leitfähigkeit keine Rolle mehr spielt, sowie es sich um Wellen von 3 cm Länge handelt. Es kommt nun darauf an, diese rein theoretische Überlegung auch experimentell zu bestätigen. Diese Bestätigung ist um so wichtiger, da bereits oben erwähnt wurde, daß die Leitfähigkeit σ keine absolute Konstante ist, wie dies in der Rechnung angenommen wurde, sondern daß sie von der Wellenlänge abhängt.

Außerdem aber soll noch experimentell festgestellt werden, ob die gutleitenden Elektrolyte in der Tat noch für solch schnelle Schwingungen als Leiter zu betrachten sind, wie es nach der vorangehenden Rechnung zu erwarten ist.

[3]) Bei der gewählten Wellenlänge von 3 cm.

Zu diesem Zweck muß ich auf einige Tatsachen der elektrischen Resonanz zurückkommen.

Wenn man eine größere Anzahl gleichlanger Metallstäbe in gleichen Abständen parallel zu einander in einer Ebene anordnet, so entsteht ein sogenanntes „Resonatorengitter"; werden diese Stäbe nämlich so orientiert, daß sie sämtlich dem elektrischen Vektor einer auf sie auffallenden elektromagnetischen Welle parallel sind, so stellt jeder Stab einen Hertzschen „Resonator" dar und die Gesamtheit der Stäbe ein ganzes Gitter von Resonatoren. Jeder dieser Resonatoren gerät also durch einen auffallenden Wellenzug ins Mitschwingen und zwar ist wichtig zu bemerken, daß er als halbe Wellenlänge, d. h. wie eine Saite, schwingt. Die Knoten der Strömung wie der magnetischen Kraft liegen an den Enden, der Knoten der elektrischen Kraft in der Mitte.

Die ausgezogene Kurve stellt die elektrische Kraft dar, die gestrichelte hingegen die Strömung oder die ihr proportionale magnetische Kraft.

Die Intensität, mit welcher der einzelne Resonator mitschwingt, ist nun für die verschiedenen Wellen sehr verschieden; sie erreicht ihren maximalen Wert, wenn der Resonator gleich der halben Länge der auffallenden Welle ist, was nach obigem ohne weiteres verständlich ist; man sagt in diesem Falle, der Sender und der Metallstab befinden sich in „Resonanz". Durch ein ganzes Gitter werden natürlich in jedem der Stäbe Schwingungen erzeugt und ein Teil der auffallenden Energie wird dazu verbraucht, um diese Schwingungen hervorzubringen. Wenn man daher ein elektromagnetisches Parallelstrahlenbündel untersucht und seine Energie, etwa durch ein Thermoelement mißt, so ergeben sich ganz andere Werte, je nachdem man zwischen Sender und Meßinstrument das Resonatorengitter einschaltet oder nicht. Die Arbeiten von Garbasso[1]), Aschkinaß und Cl. Schaefer[2]) haben nun sämtlich ergeben, daß um so weniger Energie an den Empfänger gelangt, je besser das Gitter in Resonanz mit dem Empfänger steht. Tritt Resonanz auf, so hat die durchgelassene Strahlung ihren Minimalwert erreicht, gleichzeitig aber die reflektierte

[1]) A. Garbasso, Atti. Acc. di Torino 28, 1893 und Journal de phys. (3). 2. p. 259.

[2]) E. Aschkinaß u. Cl. Schaefer. Ann. d. Phys. 5. p. 489. 1901.
Cl. Schaefer, Ann. d. Phys. 16, p. 106; 1905.
„ Archiv der Math. u. Phys. (3). 10, p. 113; 1906.

Strahlung einen Maximalwert; die Summe beider — der reflektierten und der durchgelassenen Strahlung — ist ihrer Größe nach stets der gesamten auffallenden Strahlung gleich, da auch hier, wie beim Hertzschen Gitter die Absorption keine Rolle mehr spielt.

Kennt man daher das Reflexionsvermögen für eine bestimmte Wellenlänge, so ist damit auch bekannt, wieviel von der gesamten Strahlung durch das Gitter hindurchgeht; es genügt somit die Kenntnis einer dieser beiden Größen.

Dabei ist allerdings vorausgesetzt, wenn maximales Mitschwingen bei einer Wellenlänge gleich der doppelten Lineardimension des Resonators stattfinden soll, daß die Elemente des Resonatorengitters sich gegenseitig nicht beeinflussen, was ziemlich annähernd der Fall ist, solange sie einander nicht zu nahe kommen. Wird die Dichte der Resonatoren beträchtlich, so tritt gegenseitige Beeinflussung auf; diese ist von Cl. Schaefer[1]) genauer studiert worden. Seine Resultate, auf die ich im folgenden bezugnehmen muß, sind folgende:

1. Liegen zwei Resonatoren horizontal neben einander und verringert man ihren horizontalen Abstand, so tritt maximale Resonanz bei einer Wellenlänge auf, die größer ist als die doppelte Länge eines einzelnen Resonators.

2. Liegen die Resonatoren vertikal untereinander, und verringert man den vertikalen Abstand, so tritt maximale Resonanz bei einer Wellenlänge auf, die kleiner ist als das Doppelte eines einzelnen Resonators.

Jedenfalls aber, und das ist hier die Hauptsache, spricht auch ein Resonatorengitter stets auf **eine** bestimmte Wellenlänge am besten an, es zeigt selektive Eigenschaften.

Mißt man daher die durch ein Resonatorengitter hindurchgelassene Energie, so erhält man bei den verschiedenen Wellenlängen verschiedene Werte und im Falle der Resonanz den kleinsten. Je verstimmter andererseits Sender und Gitter sind, um so größer wird die durchgelassene Energie, und aus ganz analogen Gründen erhält man ein Maximum der durchgelassenen Energie, wenn die Verstimmung am größten ist. Dieses

1) Cl. Schaefer: Ann. d. Physik. 16. p. 106—115. 1905.

Auftreten von Maxima und Minima ist nun charakteristisch für die selektiven Eigenschaften der Resonanz; sind solche Extremwerte der durchgelassenen Energie vorhanden, so muß das Gitter notwendig selektive Eigenschaften besitzen und umgekehrt.

Diese selektiven Eigenschaften der Gitter sind nun bei metallischen Leitern so scharf ausgeprägt, daß sie zu Messungen verwendet werden können. So hat man die Lage dieser Extremwerte z. B. zur Bestimmung der D—K von Flüssigkeiten benutzt, und die auf diese Weise gefundenen Werte stimmen mit denen durch andere Methoden ermittelten vorzüglich überein, was gleichzeitig als Stütze der Theorie angesehen werden muß.

Da diese Resonatoren auch noch in mancher andern Hinsicht große Bedeutung haben, so hatte es seinen besondern Reiz für mich, zu untersuchen, wie sich lauter kleine lineare Stücke dünner Wasserfäden einem elektrischen Wellenzuge gegenüber verhalten würden, falls man sie genau so anordnete, wie man dies bei den metallischen Resonatorengittern zu tun pflegt. Es ist ohne weiteres klar, daß diese Gitter ebenfalls Resonanz zeigen müßten, falls die Leitfähigkeit des Wassers einen überwiegenden Einfluß besäße, denn die Resonanz ist ja eine notwendige Folge der Leitfähigkeit. Treten diese Resonanzerscheinungen auf, so könnte man noch keinen einwandfreien Rückschluß auf die Leitfähigkeit der Resonatoren machen, denn schließlich könnte ja auch bei andern Ursachen Resonanz auftreten; die Leitfähigkeit ist zwar eine hinreichende Bedingung für das Zustandekommen der Resonanz, sie braucht deshalb aber noch keine notwendige zu sein.

Wenn dagegen bei unsern Wassergittern die selektiven Eigenschaften fehlen, so ist damit klar bewiesen, daß eine etwa vorhandene Leitfähigkeit keine Rolle spielt, daß daher auch die Polarisationserscheinungen bei dem ursprünglichen Gitter nicht auf dessen Leitfähigkeit beruhen können.

Eine weitere Aufgabe schließt sich an die erste Beweisführung unmittelbar an; es war nämlich theoretisch gezeigt, daß für gutleitende Elektrolyte, wie Schwefelsäure, der Leitungsstrom auch bei Hertzschen Wellen noch in Betracht kommen müsse. Bei Gittern aus H_2SO_4 müssen infolgedessen Resonanzerscheinungen erwartet werden.

Angeregt durch eine inzwischen von Aschkinaß[1]) veröffentlichte Arbeit über das Reflexionsvermögen der Kohle stellte ich mir als dritte Aufgabe zu untersuchen, ob gutleitende Kohle, Retortenkohle, auch Resonanzerscheinungen zeigt, oder nicht. Aschkinaß hat unter anderem dort gezeigt, daß man auch aus gutleitenden Nichtmetallen, Leitern 1. Klasse, Polarisationsgitter herstellen kann und angenommen, daß man auch umgekehrt aus der Gitterwirkung auf große Leitfähigkeit schließen kann.

[1]) Aschkinaß und Schaefer, loc. cit.

[2]) Aschkinaß, Ann. d. Phys. 18, p. 373, 1905.

Nach den obigen Ausführungen aber ist dieser Schluß im allgemeinen unzulässig; meine Beobachtung am Wassergitter gibt ein Beispiel hierfür. In der betreffenden Arbeit von Aschkinaß spielt dies allerdings keine Rolle, weil seine Ausführungen in anderer Weise vollständig sicher gestellt sind.

Damit hatte sich also meine Aufgabe wesentlich erweitert; es handelte sich jetzt darum festzustellen, wie sich (Resonatoren-) Gitter aus nichtmetallischen Leitern erster Klasse, ferner aus gutleitenden und aus schlechtleitenden Elektrolyten verhalten würden. Als Vertreter dieser verschiedenen Kategorien hatte ich Bogenkohle, Schwefelsäure (maximal leitend) und destilliertes Wasser gewählt.

Zeigen all diese Substanzen Resonanzerscheinungen oder nicht?

Versuchsanordnung.

1. Gitter von 5 cm langen Stäben.

Zur Entscheidung dieser Frage baute ich zunächst drei verschiedene Gitter, die in ihren Dimensionen zwar völlig übereinstimmten, von denen das eine aber aus Kohle, das andre aus Schwefelsäure und das dritte aus destilliertem Wasser bestand. Da bei diesen Gittern die einzelnen Stäbe nicht als unendlich lang [wie beim Polarisationsgitter] gegenüber der Wellenlänge anzusehen sind, sondern von der Größenordnung der Wellenlängen sind, und da wir ferner in diesem Fall bei metallischen Stäben Resonanzerscheinungen erhalten, so will ich diese drei Gitter auch „Resonatorengitter“ nennen. Diese Bezeichnung geschieht aber nur, um einen einfachen Ausdruck für sie zu haben und sie von dem ersten Gitter sofort zu unterscheiden; dagegen soll selbstverständlich die Frage etwaiger Resonanz noch völlig offen gelassen werden.

Die Flüssigkeiten bei diesen Gittern waren wiederum in kleine Glasröhrchen eingeschlossen. Anfänglich waren diese Röhrchen an beiden Enden zugeschmolzen, und es war in ihrer Mitte ein kleines Loch geblasen zum Einfüllen der zu untersuchenden Substanzen. Es sollte hierdurch dem Ausfließen und der übermäßigen Verdunstung vorgebeugt werden. Die Röhrchen hatten folgendes Aussehen:

Das Einfüllen bot aber ziemliche Schwierigkeiten und namentlich das Nachfüllen bei eingetretener Verdunstung war recht zeitraubend und mühselig. Viel bequemer und einfacher gestaltete es sich, als ich die Röhrchen nur an einer Seite zuschmolz und das andere Ende offen ließ. Da die Röhrchen ziemlich eng waren, nämlich vom Radius 0,2 cm, so floß auch bei dieser Form nichts aus. Die Verdunstung war nicht viel stärker als bei der ersten Art, dafür aber konnte man sie mit Hilfe einer Kapillar-

pipette sehr leicht füllen, indem man die Kapillare der Pipette bis auf den Grund des Röhrchens führte und dann erst einlaufen ließ. Es traten infolgedessen beim Einfüllen auch keine Luftblasen mehr auf, deren Beseitigung stets sehr umständlich und bei ätzenden Flüssigkeiten, wie z. B. Schwefelsäure, recht unangenehm ist.

Im ganzen waren an jedem Gitter 69 Röhrchen angebracht und zwar in drei Vertikalreihen zu je 23. Ihre Länge betrug 5 cm und ihr gegenseitiger Abstand, in vertikaler und horizontaler Richtung, je 10 mm.

2. Sender.

Sender und Empfänger waren dieselben wie beim ersten Versuch, nur versah ich sie jetzt mit metallischen Steckkontakten, sodaß man einen ganzen Wellenbereich untersuchen konnte. Man erhielt auf diese Weise Wellen von 6 bis 20 cm. Sender und Empfänger waren hierbei stets auf Resonanz abgestimmt. Der Anschaulichkeit wegen ist bereits in Figur II einer dieser Stifte mit eingezeichnet.

3. Thermoelement.

Auf einen Umstand möchte ich noch bei der Versuchsanordnung hinweisen. Als Meßinstrument nimmt man der höheren Empfindlichkeit wegen oft ein Vakuumthermoelement, d. h. ein Thermoelement, welches in eine evakuierte Röhre eingeschlossen ist. Diese Thermoelemente sind oft zwanzigmal so empfindlich wie ein gewöhnliches; sie empfehlen sich daher besonders bei Messungen recht kleiner Differenzen resp. recht kleiner Ausschläge. Trotzdem habe ich nur ein gewöhnliches, also nicht in eine Röhre eingeschlossenes, sondern ein offenes Thermoelement benutzt. Die Vakuumthermoelemente haben nämlich den großen Nachteil, daß sie mit der Zeit immer unempfindlicher werden, sodaß sie schließlich völlig unbrauchbar sind. Man ist daher in den Fällen, wo es sich um zahlreiche Messungen handelt, die sich über einen längeren Zeitraum erstrecken, manchmal genötigt, einen großen Teil der Beobachtungen mit einem anderen Thermoelement zu wiederholen. Dazu kommt, daß es nicht möglich war, ein Vakuumthermoelement auf verschiedene Wellenlängen abzustimmen, was aber in dem vorliegenden Falle hätte geschehen müssen. Erst in jüngster Zeit hat Cl. Schaefer[1]) ein Vakuumthermoelement konstruiert, bei dem dieser Mangel beseitigt ist; vorher hätte ich bei 10 verschiedenen Wellenlängen 10 verschiedene Vakuumthermoelemente gebraucht.

Einen anderen Vorteil aber bietet das Vakuumthermoelement gegenüber einem gewöhnlichen in dem Schutz gegen äußere Luftströmungen. Wenn nämlich das ans Thermoelement angeschlossene Galvanometer sehr hoch astasiert ist, so können Luftschwankungen eine Ablesung unmöglich machen. So konnte ich eine Zeitlang nur arbeiten, wenn es draußen

[1]) Cl. Schaefer. Zeitschrift f. Instrumentenkunde 1905, p. 133.

windstill war, denn obwohl das Thermoelement ca. $2^1/_2$ m vom Fenster entfernt stand, so gab infolge der schlecht schließenden Fenster im hiesigen Institut bei starkem Windstoß das Galvanometer einen Ausschlag von 50 bis 100 Millimeterskalenteile. Da es sich bei meinen Beobachtungen aber häufig um Differenzen von nur einigen Millimetern handelte, so war an ein Messen unter solchen Umständen natürlich nicht zu denken. Ich befürchtete daher, doch zu Vakuumthermoelementen übergehen zu müssen trotz ihrer oben erwähnten Nachteile. Durch eine ganz einfache Maßnahme waren aber die gewaltigen Störungen infolge Luftzuges beseitigt; ich hüllte nämlich das Thermoelement lose in Watte. Durch Watte werden nämlich Luftströmungen und Wärmeschwankungen aufgehalten, während die hier in Betracht kommenden langwelligen elektromagnetischen Strahlen ungehindert hindurchgehen.

Der übrige Aufbau stimmte genau mit dem oben beschriebenen überein; auch die Beobachtungsmethode war dieselbe; ich beobachtete also die Gesamtstrahlung, schob das Gitter ein und sah wieviel Prozent jetzt weniger an das Meßinstrument gelangte. Diesen Bruchteil der Gesamtenergie, welcher nach Einschalten des Gitters nicht an das Thermoelement gelangt [bei Messungen der transmittierten Energie also scheinbar absorbiert wird], den will ich die „Undurchlässigkeit“ des Gitters für die betreffende Wellenlänge nennen. Bei den analogen Versuchen von Garbasso, Aschkinaß und Schaefer heißt er die „Absorption“. Dieser Ausdruck hat indessen zu Mißverständnissen Veranlassung gegeben, obwohl die genannten Verfasser ausdrücklich hervorhoben, daß es sich nicht um eine Absorption im eigentlichen Sinne handle, sondern wie in der Einleitung des näheren ausgeführt ist, um eine Reflexion; die in den genannten Arbeiten als „Absorptionsvermögen“ bezeichnete Größe ist identisch mit dem Reflexionsvermögen.

Um etwaigen Mißverständnissen zu begegnen, führe ich hierfür den obigen Ausdruck „Undurchlässigkeit“ ein, bei dem es vollständig dahingestellt bleibt, wohin derjenige Teil der Energie gekommen ist, der nicht mehr an das Thermoelement gelangt. Entsprechend heißt dann der durch ein Gitter durchgelassene Bruchteil der Gesamtenergie die „Durchlässigkeit“.

Es wurde nun bei jedem Gitter die Undurchlässigkeit in ihrer Abhängigkeit von der Wellenlänge zu konstatieren gesucht. Tritt bei gewissen Wellenlängen ein Maximum der Undurchlässigkeit auf, so besteht nach den obigen Ausführungen Resonanz zwischen Gitter und Sender, an den Stellen eines Minimums dagegen die größte Dissonanz. Also aus dem Auftreten auch nur eines einzigen solchen Extremwertes ergibt sich mit Notwendigkeit, daß das Gitter selektive Eigenschaften besitzt. Auf das Auffinden solcher etwa vorhandener Extremwerte kam es also im folgenden an.

Ergebnis der Beobachtungen.

Zeichnet man die Wellenlänge als Abszisse und die Undurchlässigkeit als Ordinate ein, so zeigt sich zunächst, daß sämtliche Kurven mit wachsender Wellenlänge fallen: ihren größten Wert erreicht daher die Undurchlässigkeit bei der kleinsten angewandten Wellenlänge, d. h. bei $\frac{\lambda}{2} = 3$ cm, ohne daß dieser Wert etwa ein Maximum zu sein braucht. Die Kurven besitzen also überhaupt kein ausgeprägtes Maximum.

Wenn es sich um ein Metallgitter handeln würde, bei dem die vertikalen Abstände der einzelnen Drähte beträchtlich sind und bei dem jeder Stab 5 cm mißt, so würde das Gitter auf eine Wellenlänge von $\frac{\lambda}{2} = 5$ cm resonieren und daher bei dieser Wellenlänge ein Maximum der Undurchlässigkeit besitzen. Wenn nun aber die Kurven ein solches Maximum nicht aufweisen, so würde bei dem Metallgitter es darauf beruhen, daß sich infolge der dichten Anordnung das Maximum so weit nach links verschoben hat, daß es bei Wellen liegt, deren halbe Wellenlänge kleiner als 3 cm ist. Wenn wir aber dieselbe Dichte der Gitter beibehalten wollen und doch ein Maximum innerhalb des zur Verfügung stehenden Wellenbereichs erhalten wollen, so müssen wir naturgemäß die Gitterstäbe länger wählen, weil dann das Maximum der Undurchlässigkeit bei größeren Wellen liegt. Dieser Gesichtspunkt ist auch maßgebend für die Konstruktion unserer späteren Gitter.

Während also irgend welche Maxima bei unseren Kurven fehlen, wir also auf Grund dieses Kriteriums noch gar keinen Schluß auf Resonanz ziehen können, so ersieht man aber, daß für Kohle bei $\frac{\lambda}{2} = 9$ cm ein deutliches Minimum besteht. Auch für Schwefelsäure scheint ein Minimum zu bestehen, nur ist es nicht gut genug ausgeprägt, um bindende Schlüsse hieraus ziehen zu können. Beim Wasser dagegen ist auch keine Andeutung irgend eines Minimums vorhanden, seine Kurve läßt also noch gar keinen Extremwert erkennen.

Aus diesen Tatsachen kann man ohne weiteres den Schluß ziehen, daß Kohle die Erscheinungen der Resonanz zeigt, sich im wesentlichen also verhält wie die Metalle.

Allerdings ist dieses Minimum lange nicht so scharf ausgeprägt wie bei den Metallen, was aber nicht wunderbar ist, da es eine viel geringere Leitfähigkeit besitzt; mit dem größeren Widerstande aber ist auch eine größere Dämpfung verbunden und je größer die Dämpfung ist, um so weniger markant treten überhaupt alle Erscheinungen der Resonanz auf, auch der mechanischen Resonanz.

Auf die Bedeutung der Tatsache aber, daß Kohle überhaupt Resonanz zeigt, komme ich noch kurz zu sprechen.

Für Wasser hingegen kann man auf Grund dieser Kurve noch gar keine Entscheidung fällen, ob selektive Eigenschaften vorhanden sind oder nicht. Nur soviel erkennen wir, wenn beim Wassergitter ein Maximum der Undurchlässigkeit vorhanden sein sollte, so muß es sehr stark nach links, d. h. nach kleinen Wellen hin verschoben sein.

Um daher diese eventuellen Extremwerte des Wassers zu erhalten, mußte man zu Gittern mit längeren Stäben übergehen, wie oben des Näheren ausgeführt war. Außerdem aber muß auch das Verhalten der Schwefelsäure noch sichergestellt werden, vielleicht aber gelingt es auch, nicht nur Minima, sondern die hier weit wichtigeren Maxima aufzufinden.

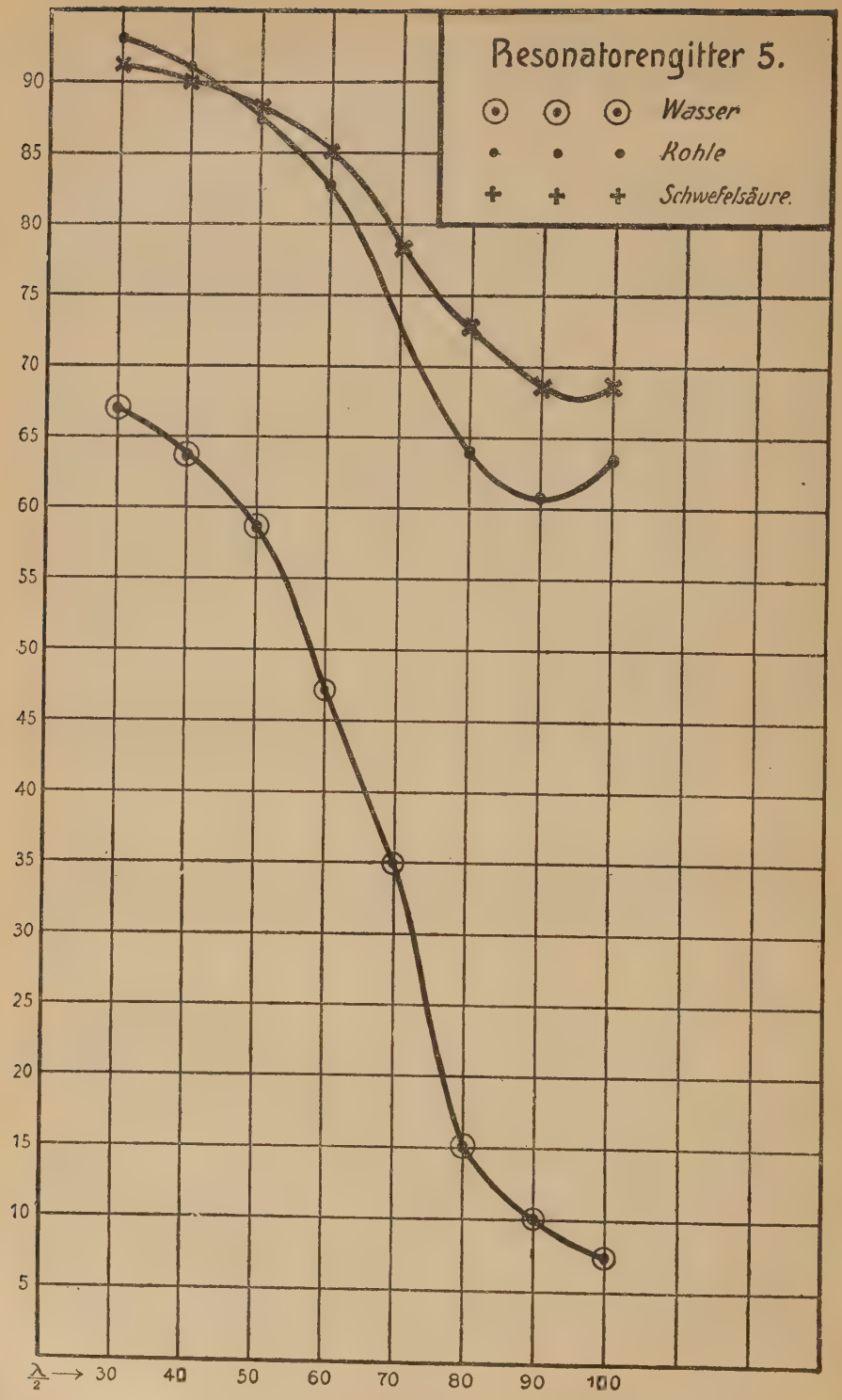
Gitter von 15 cm langen Stäben.

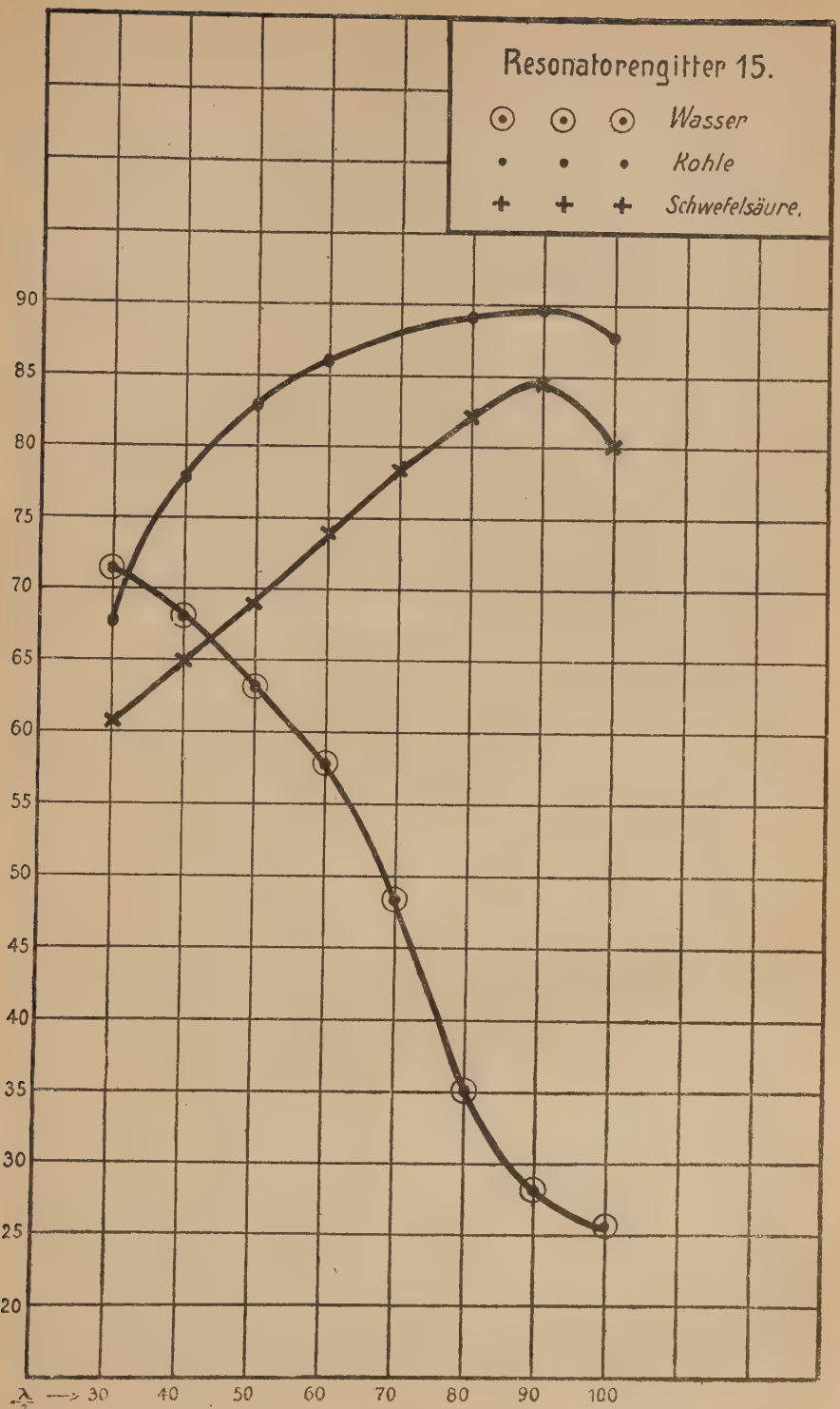
Entsprechend diesen drei Resonatorengittern baute ich daher wiederum drei weitere Gitter aus Kohle, Schwefelsäure und Wasser, die in ihren Dimensionen unter einander gleich waren und bei denen die Länge eines einzelnen Stabes 15 cm betrug. Die Stäbe waren in einer Vertikalreihe angeordnet und ihr gegenseitiger Abstand betrug 3 cm.

Die hiermit gemessenen Kurven zeigen nun für Schwefelsäure das äußerst interessante Resultat, daß mit wachsender Wellenlänge die Undurchlässigkeit des Gitters größer wird; die Kurve steigt also, während sie bei 5 cm langen Stäben fiel. Auch ist bei 9 cm ein Maximum zu erkennen. Auf die Lage dieses Maximums will ich hier nicht näher eingehen, da der Verlauf der Kurve wiederum ziemlich flach ist. Wichtig aber ist, daß die Kurve jetzt einen ganz andern Verlauf hat wie beim Gitter mit 5 cm langen Stäben. Jetzt steigt sie nämlich in dem Wellenbereich von $30 < \frac{\lambda}{2} < 90$ mm, während sie bei jenem Gitter fiel; aus diesem Umstande allein folgt nämlich schon, daß es Gitterstäbe, deren Länge zwischen 5 und 15 cm liegt, geben muß, bei der die Undurchlässigkeit ein Minimum ist, also könnte man schon hieraus auf Resonanz schließen; tatsächlich nachgewiesen ist sie ja durch das Maximum bei $\frac{\lambda}{2} = 9$ cm.

Ganz ähnlich verhält sich die Kurve für die Undurchlässigkeit des Kohlengitters; auch sie steigt im allgemeinen mit wachsender Wellenlänge und besitzt an derselben Stelle ein Maximum, das allerdings sehr flach ist.

Die Kurve für das Wassergitter hingegen zeigt denselben typischen Verlauf wie bei 5 cm langen Stäben; sie fällt mit wachsender Wellenlänge beständig ab, ohne irgend ein Maximum oder Minimum anzudeuten. Wäre das Gitter aus Metall, so würde sich für einen einzelnen Resonator etwa bei $\frac{\lambda}{2} = 15$ ein Maximum ergeben; bei der dichten Gitteranordnung sollte


Resonatorengitter 5.
Wasser
Kohle
Schwefelsäure.
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
λ/2 → 30
40
50
60
70
80
90
100


Resonatorengitter 15.
Wasser
Kohle
Schwefelsäure.
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
λ/2 —> 30
40
50
60
70
80
90
100

man es bei 9 cm erwarten, wo auch Kohle und Schwefelsäure es zeigen. Sollte also das Wassergitter überhaupt ein Maximum besitzen, so müßte sich dasselbe soweit verschoben haben, daß es bei $\frac{\lambda}{2} < 3$ cm liegt. Dieses ist aber nicht anzunehmen, denn auch bei einem Gitter aus 20 cm langen Stäben ergibt sich dasselbe typische Verhalten, sowie auch bei dem Polarisationsgitter, dessen Stäbe 48 cm lang waren.

In gleicher Weise wurden auch noch Gitter von je 10 und 20 cm langen Stäben untersucht, die indessen weitere charakteristische Eigentümlichkeiten nicht aufzuweisen hatten und deren Kurven ich deshalb nicht zeichnen will.

Resultate.

Man kommt also auf Grund dieser mit den „Resonatorengittern" angestellten Versuche zu dem Ergebnis, daß Kohle und gutleitende Elektrolyte Resonanzerscheinungen zeigen, sich also im wesentlichen wie Metalle verhalten. Dagegen besitzen Gitter aus Wasserröhren keine selektiven Eigenschaften, sie zeigen nicht Resonanzerscheinungen; bei ihnen kann daher die Leitfähigkeit keine Rolle mehr spielen. Im Gebiete der Hertzschen Wellen muß man daher Wasser als einen Nichtleiter ansehn.

Wenden wir dies auf das ursprüngliche Polarisationsgitter aus Wasser an, so ergeben also die angestellten Versuche in Übereinstimmung mit der Berechnung, daß die Polarisationserscheinungen dieses Gitters nicht auf die Leitfähigkeit des Wassers zurückgeführt werden können, sondern sie müssen, wie ich im folgenden zeigen werde, durch die hohe Dielektrizitätskonstante des Wassers verursacht worden sein.

III. Versuche mit anderen nicht-leitenden Substanzen.

2. Experimenteller Beweis.

Der soeben geführte Beweis war ein experimenteller und bedeutete somit einen Fortschritt gegenüber dem ersten, der rein rechnerisch geführt war. Trotzdem haftet ihm noch etwas Mißliches an, er ist indirekt geführt. Aus der Tatsache nämlich, daß wir Extremwerte für die Undurchlässigkeit der Wassergitter nicht fanden, schlossen wir, daß sie überhaupt nicht existieren. Wenn ich auch hoffe, daß es mir gelungen ist, die Existenz solcher Extremwerte höchst unwahrscheinlich zu machen, so ist damit doch noch nicht ihre Unmöglichkeit ausgeschlossen; damit wären dann aber auch all die weiteren Schlüsse in Frage gestellt.

Um nun auch diese Schwierigkeit zu überwinden, suchte ich direkt nachzuweisen, daß beim ursprünglichen Gitter die Polarisationserscheinungen nicht auf der Leitfähigkeit des Wassers beruhen können, sondern auf etwas ganz anderem, nämlich der hohen D-K. Zu dem Zwecke nahm ich Substanzen, die ebenfalls eine hohe D-K, aber so gut wie gar keine

Leitfähigkeit besitzen. Zu diesen Stoffen gehört das Aceton, dessen D-K gleich 21 ist, vor allem aber das Nitrobenzol mit K = 36. Namentlich dieses letztere gilt als absoluter Nichtleiter.

Ich füllte nun mit diesen Substanzen je ein Gitter, das in seinen Dimensionen und der sonstigen Herstellungsart ganz genau übereinstimmte mit dem ursprünglichen Polarisationsgitter aus Wasser. Auch die Messungen wurden genau in derselben Weise vorgenommen und durch alternierende Beobachtungen ihre „Undurchlässigkeit" in Prozenten der auffallenden Energie bestimmt.

Die Versuche ergaben, daß bei beiden Gittern eine sehr deutliche Polarisationswirkung auftrat. Nur wurde nicht alle Energie beim Durchgange durch das Gitter aufgehalten, sondern nur ein Bruchteil. Dieser Bruchteil betrug beim Aceton 25 %; beim Nitrobenzol dagegen war der Effekt bedeutend größer, wie dies der höheren D-K zufolge auch zu erwarten war, es ergaben sich bei ihm nämlich 65 %.

Stellte man die Gitterstäbe dagegen vertikal, also senkrecht zum elektrischen Vektor, so betrug die Undurchlässigkeit der Gitter nur 3 resp. 6 %.

Damit ist unzweideutig die Abhängigkeit der polarisierenden Wirkung von der D-K gezeigt; denn die als dritte Körperkonstante in Betracht kommende Permeabilität ist in beiden Fällen dieselbe, nämlich 1.

Die Leitfähigkeit aber ist in beiden Fällen sehr gering und beim Aceton größer als beim Nitrobenzol. Würde die Leitfähigkeit eine Rolle spielen, so müßte nach den obigen Ausführungen bei horizontaler Stellung der Gitterdrähte die Undurchlässigkeit des Acetongitters größer sein als die des Nitrobenzolgitters; der Versuch zeigte aber das Gegenteil. — Da aber das Verhalten eines Körpers gegenüber strahlender elektromagnetischer Energie durch drei Konstante bestimmt ist und Permeabilität und Leitfähigkeit nicht in Betracht kommen können, so bleibt nur die dritte Konstante, die Dielektrizitätskonstante übrig.

Je größer die Dielektrizitätskonstante eines Nichtleiters ist, um so mehr reflektiert er, nach der bekannten Formel:

$$R = \frac{(\sqrt{K} - 1)^2}{(\sqrt{K} + 1)^2};$$

hierbei bedeutet R das Reflexionsvermögen und K die D-K. Entsprechend seiner größeren Reflexion ist nun auch seine Undurchlässigkeit größer. Vergleicht man nach dieser Richtung hin das Wasser-, Nitrobenzol- und Acetongitter miteinander, so ist der Gang der Undurchlässigkeit tatsächlich der Größe der zugehörigen D-K entsprechend.

Daß sich nicht die Zahlenwerte ergeben wie bei der obenstehenden Formel, liegt z. T. daran, daß diese Formel für kontinuierliche Flächen streng gilt, die Ebene unseres Gitters ist ja nur zum Teil durch die betreffenden Dielektrika ausgefüllt.

Zusammenfassung.

Wenn ich die Resultate der vorliegenden Arbeit unter Berücksichtigung ihrer Bedeutung nochmals kurz zusammenfasse, so ergibt sich folgendes:

1. Es werden die Versuche von Cl. Schaefer bestätigt, nach denen sich bei der dichteren Anordnung eines metallischen Resonatorengitters das Maximum der Resonanz in einer ganz bestimmten Weise verschiebt.
2. Es ist ein Polarisationsgitter für Hertzsche Wellen konstruiert und von ihm nachgewiesen, daß seine Wirkung im Gegensatz zum Hertzschen Drahtgitter nicht auf der Leitfähigkeit beruht.
3. Damit ist ein neues Analogon zu den dichroitischen Krystallen aufgefunden. Dieses besitzt insofern größere Bedeutung als das frühere Analogon, weil das Hertzsche Drahtgitter nur äußerlich dieselben Erscheinungen aufweist, während die Ursachen für das Zustandekommen dieser Erscheinungen sicher ganz andere sind.
4. Es ist m. E. zum ersten mal der experimentelle Beweis erbracht, daß Gitter aus gutleitenden Elektrolyten selektive Eigenschaften besitzen.
5. Ebenso ist von Kohle gezeigt, daß sie sich wie ein Metall verhält, also Resonanzerscheinungen zeigt und damit auch selektive Reflexion und selektive Transmission zeigt. Durch diesen Umstand gewinnt die Frage größeres Interesse, inwieweit die großen Kohlelager die elektrischen Wellen bei der Telegraphie ohne Draht beeinflussen; denn bis jetzt ist es eine noch unerklärte Tatsache, daß eine Verständigung über Wasser viel leichter ist als über Land.[1])
7. Gleichzeitig ist auch im Prinzip eine neue Methode zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten gegeben, indem man die Schutzwirkung eines Gitters resp. einer einzelnen Röhre bestimmt, die mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist.

---

[1]) cf. Poincaré: La théorie de Maxwell et les oscillations Hertziennes. La télégraphie sans fil. 1904. p. 96.

Lebenslauf.

Ich, Max Laugwitz, bin am 13. Oktober 1879 zu Breslau als Sohn des jetzt verstorbenen Eisenbahn-Packmeisters Liborius Laugwitz zu Breslau geboren. Von Ostern 1886—1890 besuchte ich eine hiesige Volksschule, von 1890—1891 eine Höhere Bürgerschule und von Ostern 1891 ab das hiesige Johannesgymnasium, an dem ich 1901 mein Abiturientenexamen ablegte.

Seitdem studierte ich an der hiesigen Universität Physik nebst ihren Nachbarwissenschaften, sowie Philosophie. Die von mir veröffentlichten Arbeiten sind:

1. „Kants Stellung zu den Gottesbeweisen.“ Preisarbeit der philosophischen Fakultät 1904.
2. „Zur Theorie des Hertz'schen Erregers und über Strahlungsmessungen an Resonatoren.“ Clemens Schaefer u. M. Laugwitz Annalen der Physik Bd. 20 p. 355. 1906.
3. „Über die bei Reflexion elektrischer Wellen an Hertzschen Gittern auftretenden Phasenverluste.“ Clemens Schaefer u. M. Laugwitz Annalen der Physik Bd. 21 p. 587. 1906.

Während meiner Studienzeit besuchte ich die Vorlesungen der folgenden Herren Professoren und Dozenten:

Baumgartner, Casper, Ebbinghaus, Franz, Frech, Freudenthal, Hertz, Hintze, Hoffmann, Kükenthal, Ladenburg, London, Lummer, O. E. Meyer, E. Neumann, Pringsheim, Rosanes, Schaefer, W. Stern und Sturm.

Allen diesen meinen hochverehrten Lehrern sage ich meinen verbindlichsten Dank; ganz besonderen Dank schulde ich Herrn Professor Lummer für das stete Interesse, welches er meiner Arbeit gewidmet hat.

Die Anregung zu dieser Arbeit verdanke ich Privatdozenten Herrn Dr. Clemens Schaefer, dem ich für seine freundliche Unterstützung bei der Ausführung derselben dauernd zu aufrichtigem Danke verpflichtet bin.